

УДК 621.3.011+621.3.013+621.313:62-799

**СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРШЕННІ ЗАДАЧ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

**Н.А.Шидловська**, член-кореспондент НАН України, **Ю.М.Васецький**, докт.техн.наук,  
**М.В.Мислович**, докт.техн.наук, **І.В.Хімюк**, канд.техн.наук,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

*Висвітлюються основні наукові результати, отримані у відділі теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки НАН України за підсумком виконання науково-дослідної теми «Комплекс-2», яка розроблялася протягом 2006–2010 років. Дослідження проводилися за основними напрямками роботи відділу: розвиток теорії і створення ефективних аналітичних методів дослідження процесів у нелінійних електричних колах; розробка асимптотичних та чисельно-аналітичних методів розрахунку електромагнітних систем; розвиток теорії і методів практичного використання інформаційно-вимірювальних систем статистичної діагностики електроенергетичного обладнання; розробка математичних моделей та чисельне дослідження зв'язаних електромагнітних, механічних і акустичних полів у електроенергетичному обладнанні. Бібл. 38, табл. 1, рис. 6.*

**Ключові слова:** математична модель, аналітичний метод, електротехнічне обладнання, технічна діагностика.

**Вступ.** Електроенергетика – одна з найважливіших стратегічних галузей народного господарства будь-якої країни. Україна самостійно і повністю забезпечує себе електроенергією. Крім того, частина виробленої електроенергії експортується в Європу та сусідні країни. На жаль, стан основного електроенергетичного обладнання (ЕО) вирізняється істотною зношеністю. Ряд об'єктів уже повністю відпрацювали свій ресурс, значна кількість знаходиться на крайніх стадіях моральної та фізичної зношеності. І хоча нові енергоблоки електростанцій іноді вводяться в експлуатацію, повна заміна застарілого обладнання в енергетиці на даний час неможлива, оскільки потребує колосальних коштів, часу і трудових затрат. Альтернативою цьому може бути підтримання існуючих об'єктів у нормальному робочому стані за рахунок попередження аварій, своєчасного проведення профілактичних та ремонтних робіт. При цьому затрати незрівнянно менші, ніж при повній заміні обладнання, і з'являється деякий запас по часу для поетапного проведення модернізації.

Для вирішення цих задач у відповідності до Постанови Кабінету міністрів України №58 від 21 вересня 2000 року було прийнято «Комплексну Програму з визначення технічного стану, залишкового ресурсу та безпечної експлуатації об'єктів та споруд у промисловості, енергетиці, будівництві та інших галузях народного господарства». Певний внесок у виконання цієї Програми було зроблено співробітниками відділу теоретичної електротехніки шляхом виконання теми «Комплекс – 2» «Розробити перспективні методи дослідження електрофізичних процесів і полів електроенергетичного обладнання для підвищення його ефективності та подовження терміну експлуатації», розробка якої проводилася протягом 2006–2010 років. Підставою для проведення цієї НДР стала Постанова Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України від 30.03.2006 р., протокол № 5. Виконана робота є поглибленням, продовженням та розширенням досліджень, що були проведені в межах теми «Комплекс» у 2001–2005 роках.

Головна мета роботи полягала в одержанні фундаментальних результатів у галузі теоретичної електротехніки, електрофізики, теорії інформаційно-вимірювальних систем та їх практичному використанні для підвищення ефективності електроенергетичного обладнання та подовження терміну його експлуатації.

Об'єктом дослідження в НДР «Комплекс – 2» були електромагнітні процеси і поля, а також деякі інші фізичні процеси, що супроводжують роботу окремих вузлів ЕО (турбогенератори, крупні електричні машини, трансформатори, двигуни внутрішніх потреб електростанцій, вітроелектричні агрегати тощо).

Одержані при виконанні НДР результати обговорювалися на численних Міжнародних науково-технічних конференціях, а також на семінарах Інституту електродинаміки. За результатами роботи опубліковано 48 статей у наукових виданнях України та зарубіжжя.

Роботи над виконанням теми «Комплекс – 2» велись за такими основними напрямками:

- розвиток теорії і створення ефективних аналітичних методів дослідження процесів у нелінійних електричних колах (керівник – член-кор. НАН України Н.А.Шидловська);
- розробка асимптотичних та чисельно-аналітичних методів розрахунку електромагнітних систем (керівник – докт.техн.наук, професор Ю.М.Васецький);
- розвиток теорії і методів практичного використання інформаційно-вимірювальних систем статистичної діагностики електроенергетичного обладнання (керівник – докт.техн.наук, професор М.В.Мислович);
- розробка математичних моделей та чисельне дослідження зв'язаних електромагнітних, механічних і акустичних полів у електроенергетичному обладнанні (керівник – канд.техн.наук, ст.наук.співр. І.В.Хімюк).

Коротко зупинимось на основних наукових результатах, одержаних у ході виконання теми.

### 1. Розвиток аналітичних методів дослідження нелінійних $RLC$ -кіл.

Дослідження нелінійних  $RLC$ -кіл за допомогою аналітичних методів мають певні особливості [31]. Наприклад, вибір математичного методу для аналізу процесів у колі залежить від вигляду залежності нелінійного елемента. Застосування в рівнянні апроксимаційної залежності нелінійної характеристики елемента  $RLC$ -кола у вигляді степеневого ряду не викликає труднощів, однак залежності у вигляді дрібно-раціональних, логарифмічних, гіперболічних та інших складних функцій вимагають особливого підбору математичного методу для практичного використання. Значною мірою вибір математичного методу обумовлюється виглядом наближеного розв'язку, який є відображенням фізичних властивостей досліджуваної системи.

До того ж, оскільки використання аналітичних методів для аналізу процесів у нелінійних електричних колах пов'язано з великою трудомісткістю, громіздкістю обчислень та складністю розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, при ускладненні нелінійних кіл виникає необхідність використання нових математичних методів, можливих для практичного застосування [24,26,29].

Під час роботи за темою «Комплекс-2» було запропоновано нові аналітичні підходи до аналізу нелінійних електричних кіл, а саме: було запропоновано новий оригінальний метод розрахунку процесів у слабо нелінійних коливальних колах з втратами, який ґрунтується на розкладанні розв'язків слабо нелінійної системи по розв'язках незбуреної (породжуючої) системи, за допомогою якого було проведено розрахунки кіл з різними нелійними елементами. Також вперше було проаналізовано нелінійні електричні кола з втратами методом усереднення Боголюбова. Цей метод наводиться як приклад для випадку нелінійності індуктивності (нелінійність при старшій похідній).

Було проаналізовано коло розряду конденсатора на лінійний опір та індуктивність з феромагнітним осердям. З урахуванням нелінійності потокозчеплення таке коло описується рівнянням

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L_0} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{L_0 C} = \varepsilon \frac{3}{L_0} \left( \frac{dq}{dt} \right)^2 \frac{d^2q}{dt^2}, \quad (1)$$

де  $q$  – величина заряду на конденсаторі,  $R$  – опір навантаження,  $C$  – ємність конденсатора,  $L_0$  – індуктивність, що відповідає лінійному випадку,  $\varepsilon$  – малий параметр.

Виконуючи зі співвідношенням (1) деякі математичні перетворення і враховуючи члени не вище першого порядку малості по  $\varepsilon$ , маємо

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L_0} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{L_0 C} = -\varepsilon \left[ \frac{R}{L_0} \left( \frac{dq}{dt} \right)^3 + \frac{q}{L_0 C} \left( \frac{dq}{dt} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

$$\text{Були введені позначення} \quad q = x_1; \quad \dot{q} = x_2, \quad (3)$$

і рівняння (2) перетворили у систему двох рівнянь першого порядку

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{x_1}{L_0 C} - \frac{R}{L_0} x_2 - \varepsilon \frac{3}{L_0} x_2^2 \left( \frac{R}{L_0} x_2 + \frac{x_1}{L_0 C} \right) \end{cases}. \quad (4)$$

Нульовий розв'язок лінеаризованої системи (4) є асимптотично стійким, тобто для її аналізу змогли застосувати асимптотичний метод усереднення Боголюбова [7]. Для цього переписали рівняння (2)

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega^2 q = \varepsilon \left[ -\frac{3R}{L_0^2} \left( \frac{dq}{dt} \right)^3 - \frac{3q}{L_0^2 C} \left( \frac{dq}{dt} \right)^2 \right], \quad (5)$$

де  $2\delta = \frac{R}{L_0}, \quad \omega^2 = \frac{1}{L_0 C}.$

Для визначення величини заряду функцію  $q = q(t)$  записали

$$q = ae^{-\delta t} \cos \varphi, \quad (6)$$

де  $a = a(t), \varphi = \varphi(t)$  – нові невідомі функції, які шукали таким чином, щоб виконувалась рівність

$$\frac{dq}{dt} = -ave^{-\delta t} \sin \varphi - a\delta e^{-\delta t} \cos \varphi, \quad (7)$$

де  $v^2 = \omega^2 - \delta^2.$

Виходячи зі співвідношення (6), було обчислено першу і другу похідні і після певних підстановок і математичних перетворень знайдено кінцевий вираз для заряду на конденсаторі

$$q(t) = \frac{e^{-\delta t}}{\sqrt{\frac{1}{a_0^2} + \varepsilon \frac{3\omega^2}{2L_0} (1 - e^{-2\delta t})}} \cos \left[ \varphi_0 + vt - \frac{3\omega^2 - 4v^2}{8v^2 \delta} \left[ \ln \left( \frac{1}{a_0^2} + \varepsilon \frac{3\omega^2}{2L_0} (1 - e^{-2\delta t}) \right) - \ln \frac{1}{a_0^2} \right] \right]. \quad (8)$$

Таким чином, з використанням методу усереднення Боголюбова вперше аналітично вирішена задача розряду конденсатора на лінійне навантаження і нелінійну індуктивність.

Також було виконано чисельне розв'язання тієї ж задачі засобами математичної системи MathCad' 2001. Проведене порівняння розрахункових результатів показало їхню збіжність у межах не вище 4%. Відповідні графіки для коливального режиму розряду конденсатора показані на рис. 1.

Під час роботи за темою «Комплекс - 2» було отримано наступні результати [22,25,27,28,30].

1. Вперше запропоновано методіку розрахунку процесів у слабо нелінійному коливальному

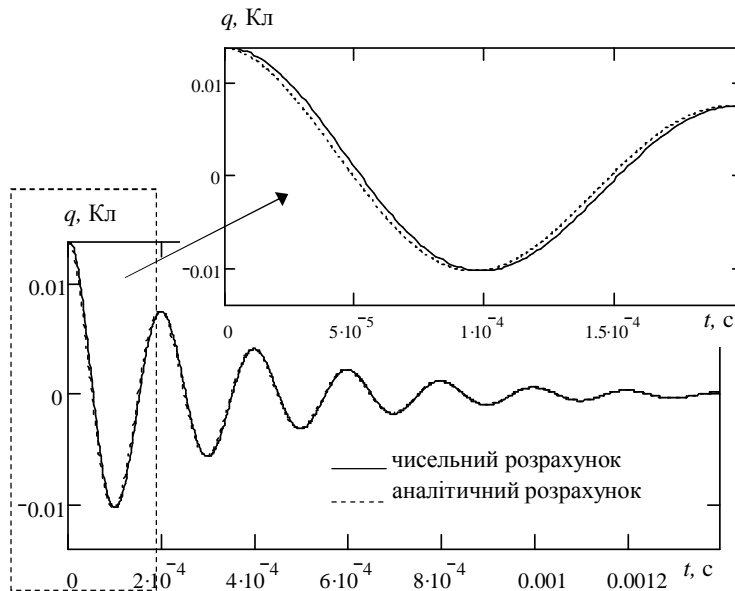


Рис. 1

ко нелінійних колах з втратами. Деяка складність запропонованого алгоритму полягає в необхідності визначення відповідних сталих інтегрування  $C_1, C_2$  при заданих початкових умовах з нелінійних співвідношень. Запропонована методіка має значну перевагу – при аналізі не накладається ніяких умов щодо характерис-

ти кола з втратами, що засновується на застосуванні методу усереднення Боголюбова. Перевагами цього методу є порівняна простота розрахунків та менша громіздкість отриманих у результаті аналізу формул. Разом з тим необхідно зазначити, що суттєвими перевагами запропонованого методу є надзвичайна точність розрахунків, яка впливає з порівняння результатів чисельних розрахунків початкового рівняння, що описує процеси в розрядному колі, та розв'язку за підсумковою формулою, одержаною методом усереднення Боголюбова.

2. Запропоновано новий алгоритм розрахунку наближених розв'язків диференціальних рівнянь, що описують процеси в слаб-

тичного рівняння (методика дає можливість за однаковим алгоритмом обчислювати як аперіодичний, так і коливальний розряд конденсатора). При використанні методики шляхом спеціальної заміни відбувається перехід від нелінійного диференціального рівняння до системи лінійних диференціальних рівнянь, що робить можливим розв'язання більшості нелінійних диференціальних рівнянь з вибраною точністю (залежно від вибраних заміни), що і є основною перевагою означеного методу.

3. На прикладі *RLC*-кола з нелінійною індуктивністю шляхом порівняння аналітичних розрахунків з чисельними доведено ефективність оригінального аналітичного методу. Порівняльний аналіз чисельних розрахунків з аналітичними при різних параметрах і початкових умовах електричного кола показав, що запропонований аналітичний метод може застосовуватися для вивчення аперіодичного і коливального розрядного процесів у випадку, коли відношення нелінійної частини до лінійної складової у виразі для індуктивності не перевищує 0,01 для аперіодичного розряду і 0,1 – для періодичного. При цьому відносна похибка результатів чисельного і аналітичного розрахунків складає менше 1–1,5% для аперіодичного режиму і не більше 0,9% – для періодичного розрядного процесу.

У рамках напрямку розробки асимптотичних та чисельно-аналітичних методів розрахунку електромагнітних систем було виконано наступні дослідження і одержано відповідні результати:

- узагальнено результати досліджень по розробці асимптотичних методів рішення задач електродинаміки в системах з масивними криволінійними провідниками складної конфігурації; за результатами у видавництві «Наукова думка» у 2010 р. вийшла відповідна монографія [8];

- отримав подальший розвиток асимптотичний метод розрахунку квазістационарного тривимірного електромагнітного поля довільного контура зі струмом, що розташований над електропровідним середовищем, в результаті якого розроблено наближений спосіб розрахунку інтегральних характеристик (еквівалентного опору) електромагнітних систем з урахуванням індукованих струмів в електропровідному середовищі, а також отримано оцінки геометричних параметрів індукційних систем високочастотного нагріву металевих смуг [9–11,38];

- розроблено метод і проведено параметричний аналіз конфігурацій тороїдальних і циліндричних систем надпровідних індуктивних накопичувачів, у тому числі проаналізовано тороїдальну систему з нахиленими котушками, для якої встановлено кут нахилу котушок, коли опорна механічна система непотрібна, а розміри системи і маса надпровідної обмотки менші, ніж у накопичувача традиційної конфігурації [1,12].

У цій роботі більш докладно зупинимося на питанні створення наближених математичних моделей в пристроях з індукованими струмами в провідному середовищі.

## 2. Наближені математичні моделі для розрахунку електромагнітних систем з плоскими і просторовими контурами зі струмом.

Створення нового електротехнічного обладнання для високоекономічних технологій висуває необхідність розробки математичних моделей з урахуванням найбільш важливих факторів та специфічні особливості, які визначають процеси, що протікають. У цьому випадку математичні моделі зазвичай виявляються більш простими, результати досягаються за допомогою більш економних способів, пристосованих до вирішення специфічного класу задач. У результаті з'являється можливість ефективно вирішувати не тільки задачі аналізу, але й синтезу електромагнітних полів, а також проводити багатопараметричну оптимізацію пристроїв. Крім того, спеціалізовані програми можуть бути частиною універсальних пакетів прикладних програм. Тому в даній роботі ставиться мета застосування асимптотичних методів для розробки наближених математичних моделей і розрахунку тривимірних електромагнітних полів, в яких враховуються усі основні геометричні параметри електромагнітних систем і електрофізичні властивості провідних середовищ. Об'єктом дослідження є електромагнітна система для високочастотного індукційного нагріву металеві стрічки з беззалізним індуктором у вигляді контура зі струмом, що розташований над поверхнею рухомої стрічки (рис. 2).

При розробці математичних моделей враховується, що наступні безрозмірні параметри є малими [9–11,38]:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta}{d}, \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{h} \left( \frac{\mu}{\omega \mu_0 \gamma} \right)^{1/2}, \quad \varepsilon_3 = \frac{v}{\omega h}, \quad \varepsilon_4 = \frac{h}{D}, \quad (9)$$

де  $\delta$  – глибина проникнення поля,  $\omega$  – циклічна частота,  $\gamma$  –

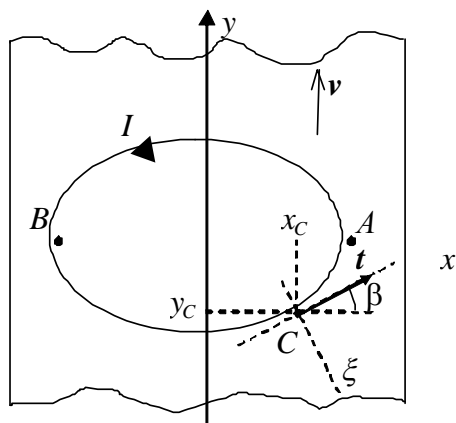


Рис. 2

електропровідність,  $\mu$  – відносна магнітна проникність,  $d$  – товщина стрічки;  $h$  – висота розташування провідника індуктора над поверхнею стрічки,  $v$  – швидкість стрічки;  $D$  – характерний розмір контура індуктора. Для проведення оцінок будемо обмежуватися першим ненульовим членом густини потоку електромагнітної енергії в електропровідне середовище

$$P_z = \frac{I^2 \zeta}{\pi^2 h^2} \cdot \frac{1}{(1 + \xi^2 / h^2)^2}, \quad (10)$$

де  $\zeta = \sqrt{\omega \mu \mu_0 / 2\gamma}$  – модуль величини поверхневого імпедансу.

**Параметри електромагнітних і теплових процесів для наближених математичних моделей високочастотного індукційного нагрівання електропровідних стрічок.** Тепло, що виділяється при протіканні в електропровідному середовищі індукційних струмів, переноситься потім рухом металеві стрічки, а також передається за рахунок теплопровідності середовища. Поставимо завдання знайти умови, за яких можна в математичній моделі розділити електромагнітну і теплові задачі [11].

При аналізі передачі тепла у перпендикулярному до стрічки напрямку треба враховувати, що характерним розміром у цьому напрямку, у межах якого відбувається передача електромагнітної енергії в метал, є глибина проникнення поля, що для високочастотного способу нагрівання звичайно значно менше товщини стрічки. Параметром, що відображає характер теплопередачі вглиб стрічки, може служити відношення часу встановлення однорідної температури по товщині до характерного часу нагрівання. У відповідності із цим параметром температура вирівнюється по товщині вже за час проходження стрічки під провідником зі струмом. Тому в математичних моделях температура може бути прийнята всюди однорідною по товщині, за винятком ділянок, які в даний час перебувають під провідником контура.

Аналіз процесу теплопередачі уздовж поверхні металеві стрічки в напрямку вектора руху доцільно проводити, порівнюючи два протилежно спрямованих теплових потоків: потік, що обумовлений переносом тепла рухом середовища  $U_{v1}$ , та потік, пов'язаний з теплопровідністю  $U_1$ . Наступний параметр характеризує ці два процеси:

$$\varepsilon_{L1} = \left| \frac{U_{1\max}}{U_{v1}} \right| = \frac{\lambda}{c\rho v} \cdot \frac{p_z(0, h)}{\int_{-\infty}^{\infty} p_z(\xi, h) d\xi}, \quad (11)$$

де  $c$  – питома теплоємність,  $\lambda$  – теплопровідність,  $\rho$  – густина середовища,  $U_{1\max}$  – максимальне значення  $U_1$ .

Для стрічок з алюмінію, латуні і сталі при  $h = 3 \cdot 10^{-2}$  м і швидкості руху  $v = 10^{-1}$  м/с значення параметра  $\varepsilon_{L1}$  наведено в таблиці.

	Алюміній	Латунь	Сталь
$\varepsilon_{L1}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
$\varepsilon_{L2}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$

Видно, що у всіх випадках і навіть при швидкості в декілька см/с за рахунок стрибка температури в області провідника теплопровідністю контура можна нехтувати в порівнянні з

переносом тепла за рахунок руху нагрітого металу.

Теплопередачу вздовж поверхні металеві стрічки в напрямку, перпендикулярному вектору руху, треба враховувати поблизу країв контура. Оцінка може бути проведена за параметром  $\varepsilon_{L2} = W_{2\max} / W_{v2}$ , де  $W_{2\max}$  – максимальне значення теплової енергії, що була передана теплопровідністю по краю контура за час нагрівання;  $W_{v2}$  – теплова енергія, що була передана електромагнітним полем тієї самої ділянки стрічки. З урахуванням (10) маємо наближений вираз для цього параметра

$$\varepsilon_{L2} = 1,3 \cdot \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{D}{vh^2}. \quad (12)$$

Значення  $\varepsilon_{L2}$ , що наведені в таблиці, показують незначну величину теплопередачі порівняно з теплопереносом завдяки руху металу.

Таким чином, у напрямках уздовж поверхні металеві стрічки процес нагрівання можна назвати адиабатичним нагріванням тонких металевих стрічок.

**Геометричні параметри електромагнітних систем.** З урахуванням наведених обмежень температура  $T$  у будь-якій точці стрічки, що рухається, буде [10]

$$T(x, y) = P(x, y) / c \rho v d = \int_{-\infty}^y p_z(\xi, h) d\xi / c \rho v d. \quad (13)$$

Інтегрування з урахуванням (10) може бути виконано в аналітичному вигляді з обмеженнями, що будуть справедливі на окремих ділянках контура. В результаті отримано наближені вирази для умови рівномірного нагріву стрічки:

– для ділянки вдалині від краю контура:

$$h_C \cos \beta = \text{const}; \quad (14)$$

– для ділянки поблизу краю контура, що має кривизну  $R$  і відстань  $h_A$  від поверхні стрічки в цій точці,

$$\frac{3 R^{1/2} h_C \cos \beta}{4 h_A^{3/2}} = 1. \quad (15)$$

З останнього виразу, зокрема, випливає, що для рівномірного нагріву стрічки можуть використовуватися як просторові контури (наприклад, що мають у проекції до площини стрічки кругову форму), так і більш прості плоскі контури, але зі змінною кривизною (наприклад, у вигляді еліпсу, що має більшу вісь у напрямку, перпендикулярному напрямку руху стрічки. Більш детальний розрахунок показує, що обидва способи можуть бути реалізовані, а прості вирази (13) і (14) з достатньою точністю виконуються за умови рівномірного нагріву стрічки). Звідси можна зробити висновок про доцільність, принаймні на початковому етапі знаходження геометрії електромагнітної системи, використання запропонованого підходу із застосуванням асимптотичного методу розрахунку.

### **3. Розвиток теорії та створення методів практичної реалізації інформаційно-вимірвальних систем статистичної діагностики електроенергетичного обладнання.**

Сучасні інформаційно-вимірвальні системи (ІВС) діагностики базуються на певних математичних моделях, що покладені в їхню основу. Це, перш за все, детерміновані або статистичні моделі, які визначають як порядок функціонування самої ІВС, так і методи обробки діагностичних сигналів. Виходячи з цього, при розробці даного напрямку основну увагу було приділено як побудові і дослідженню математичних моделей діагностичних сигналів, так і створенню власне ІВС, що реалізують статистичні методи обробки цих сигналів. Особливість деяких типів систем, що було створено, є можливість здійснювати прогнозування можливих відмов певних вузлів електроенергетичного обладнання. Коротко зупинимося на цих питаннях.

При розробці даного напрямку було вирішено цілу низку питань, присвячених:

- побудові математичних імовірнісних моделей деяких видів діагностичних сигналів, що супроводжують роботу електроенергетичного обладнання (ЕО);
- створенню методів імітаційного моделювання діагностичних сигналів АЕ в залежності від технічного стану вузлів ЕО;
- розробці технічних засобів для ІВС статистичної діагностики рухомих частин ЕО та прогнозування його відмов;
- розробці методів, алгоритмів та програмного забезпечення для ІВС статистичної діагностики з можливістю прогнозування відмов вузлів ЕО.

Методи побудови математичних моделей діагностичних сигналів базувалися на використанні елементів теорії лінійних випадкових процесів [20].

Лінійним випадковим процесом (ЛВП) називають функціонал наступного виду [20]:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau), \quad t \in T, \quad (16)$$

де  $\{\eta(\tau), \eta(0) = 0, \tau \in (-\infty, \infty)\}$  – стохастично неперервний випадковий процес з незалежними приростами, який називають породжуючим;  $\varphi(\tau, t)$  – не випадкова числова функція, для якої виконується умова  $\left| \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^p(\tau, t) d\kappa_p(\tau) \right| < \infty, p = 1, 2$ , де  $\kappa_p(\tau)$  – семіінваріант  $p$ -го порядку процесу  $\eta(\tau)$ ;  $T \in (-\infty, \infty)$ .

ЛВП, що задається (16), належить до класу процесів з безмежно подільними законами розподілу [20]. Внаслідок цього, для даних процесів існує канонічне представлення характеристичної функції (ХФ). Як відомо [20], існують три форми ХФ, а саме, форма Леві, Леві-Хінчина і Колмогорова (остання використовується лише для гільбертових процесів). Всі вищезгадані форми канонічного зображення ХФ однозначно взаємопов'язані, і використання будь-якої з них визначається умовами конкретної задачі. Оскільки ЛВП має скінченну дисперсію, то для розв'язування багатьох практичних задач, у тому числі й для дослідження процесів акустичної емісії (АЕ), зручно використати канонічне представлення у формі Колмогорова [20]

$$f(u; \tau) = \exp \left\{ ium(\tau) + \int_{-\infty}^{\infty} (e^{iux} - 1 - iux) \frac{dK(x, \tau)}{x^2} \right\}, \quad \tau \in (-\infty, \infty), \quad (17)$$

де  $m(\tau) = \mathbf{M}\eta(\tau)$ ;  $K(x, \tau)$ ,  $x \in (-\infty, \infty)$  – неспадна по  $x$  неперервна зліва обмежена функція. Підінтегральна функція при  $x = 0$  приймається рівною по неперервності -  $u^2/2$ .

Функція  $K(x, \tau)$  називається спектральною функцією або пуассонівським спектром стрибків у формі Колмогорова. У випадку, коли  $K(-\infty, \tau) = 0$ ,  $K(\infty, \tau) = \mathbf{D}\eta(\tau)$ . Слід зазначити, що  $K(x, \tau)$  по  $x$  є функцією розподілу з точністю до невід'ємного числового множника, рівного  $\mathbf{D}\eta(\tau)$ .

Таким чином, клас ЛВП замкнутий відносно лінійних перетворень, причому в більшості випадків ці перетворення зводяться до відповідних операцій над невідповідними функціями – ядрами інтегральних зображень ЛВП. Ця особливість ЛВП у сукупності з існуванням в явному вигляді їхніх  $n$ -вимірних ХФ дозволяє здійснювати повний імовірнісний аналіз як самих процесів, так і результату їхніх перетворень, які описуються лінійними операторами. Цей факт є безсумнівною перевагою ЛВП як моделей реальних фізичних процесів, оскільки дозволяє аналізувати проходження цих процесів через лінійні тракти діагностичних ІВС навіть у негауссівських випадках.

З використанням класу ЛВП було побудовано низку моделей діагностичних сигналів, що супроводжують роботу електротехнічного обладнання (ЕО). Коротко зупинимось на деяких з них.

**Моделі процесів вібрації вузлів ЕО.** Створення цих моделей було орієнтовано на використання в ІВС як тестової, так і функціональної діагностики. Серед систем тестової діагностики основну увагу було приділено моделям вібрацій для ІВС ударної діагностики ЕО.

Робота ІВС ударної діагностики базується на вимірюванні та дослідженні діагностичного сигналу – ударної хвилі, збудженої в окремих вузлах, які діагностуються.

При побудові математичних моделей ударної вібраційної хвилі припускалося, що досліджуваний вузол як механічна система має лінійні властивості, тобто його реакція завжди пропорційна силі збудження. Це припущення дає такі наслідки:

- частотні характеристики досліджуваної механічної системи не залежать від рівня збудження (властивість однорідності);
- частотні характеристики досліджуваної механічної системи не залежать від типу і форми хвилі збудження (властивість накладання).

У більшості випадків досліджувані вузли дійсно мають лінійні властивості з незначними відхиленнями, якими можна знехтувати. Але припущення про лінійність не буде справедливим, коли деформації, викликані ударним впливом, занадто великі, наприклад, при серйозних механічних пошкодженнях досліджуваних вузлів або при сильному ударі, що призводить до незворотних пластичних деформацій матеріалу вузла.

При побудові математичних моделей ударних діагностичних сигналів було використано лінійний випадковий процес, що може бути в загальному випадку представлений у вигляді (16). Основні результати з побудови і дослідження даних сигналів наведено у [15].

**Моделі процесів вібрації рухомих вузлів електричних машин.** Перш за все, слід відзначити, що цей вид моделей було використано в ІВС функціональної діагностики. При побудові даних моделей враховувалася така властивість роторних електричних машин як циклічність процесів, що супроводжують їхню роботу [19]. Найбільш адекватно така циклічність може бути описана за допомогою лінійних періодичних випадкових процесів (ЛПВП). Часто під циклічністю розуміється стохастична періодичність [19], яка визначає властивість характеристик випадкового процесу повторюватися у часі через відомий період  $T$ , причому реалізації процесу можуть бути і неперіодичними. Викор-

ристання класу ЛПВП при описі таких процесів, а саме використання їхньої характеристичної функції (17) дає можливість отримати повні ймовірнісні характеристики досліджуваних процесів.

Основні характеристики і властивості математичних моделей вібрацій рухомих частин роторних електричних машин (РЕМ), що базуються на елементах теорії ЛПВП, описано у роботах [13, 14]. Той факт, що ЛПВП мають безмежно подільні функції розподілу, для яких відома загальна канонічна форма характеристичної функції (17), дає можливість розв'язувати прикладні задачі аналізу циклічних фізичних процесів з урахуванням їхніх законів розподілу в повному обсязі. Взагалі, клас ЛПВП дозволив побудувати цілу низку математичних імовірнісних моделей, що описують діагностичні сигнали різної фізичної природи, які супроводжують роботу РЕМ. Так, з використанням ЛПВП було створено і досліджено математичні моделі нерівномірності кутової швидкості та обертових моментів [13] на валу РЕМ.

**Моделі процесів акустичної емісії у вузлах ЕО.** Дослідження механізмів генерування АЕ, яка супроводжує такі явища в твердих тілах, як пластична деформація двійкуванням і зернограничне ковзання, виникнення і розвиток тріщин, корозія, тертя тощо, дають підстави вважати, що фізичні процеси, що породжують неперервну і дискретну АЕ, існують сумісно [23]. Однак у відомих роботах щодо математичного моделювання сигналів АЕ цей факт не завжди враховується.

При побудові математичної моделі сигналу АЕ з використанням ЛВП (16) припускалося, що під неперервною емісією розуміється неперервна у часі генерація деяким джерелом флукуаційного сигналу АЕ, а під імпульсною (дискретною) – спрацювання цього джерела у певні моменти часу, в результаті чого випромінюється імпульс. На основі зроблених фізичних припущень загальну модель сигналу АЕ можна представити у вигляді суми незалежних неперервної та імпульсної складових досліджуваного сигналу

$$x(t) = v_1 x_c(t) + v_2 x_i(t), \quad (18)$$

де  $v_1$  і  $v_2$  – вагові коефіцієнти, що характеризують величину внеску неперервної  $\xi_c(t)$  та імпульсної  $\xi_i(t)$  компоненти в сигнал АЕ загального виду (18). Припускається, що величина коефіцієнтів  $v_1$  і  $v_2$  залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу об'єкту, що діагностується і в якому виникає АЕ сигнал.

Використання моделі дозволяє знайти повні ймовірнісні характеристики процесу АЕ, оскільки для ЛВП відомий загальний вид ХФ. Поряд з ХФ повною ймовірнісною характеристикою процесу  $\xi(t)$  є його функція розподілу, яка однозначно визначається по ХФ за допомогою перетворення Фур'є-Стільтьєса. Питання визначення повних ймовірнісних характеристик сигналу АЕ (18) докладно розглянуто у роботі [23].

**Методи імітаційного моделювання діагностичних сигналів АЕ у вузлах ЕО.** На основі побудованої моделі сигналу АЕ було створено програму і проведено імітаційне моделювання імпульсної складової досліджуваного сигналу АЕ. Алгоритм цієї програми базувався на тому, що канал виникнення і розповсюдження в досліджуваному об'єкті сигналу АЕ може бути представлений у вигляді, показаному на рис. 3.

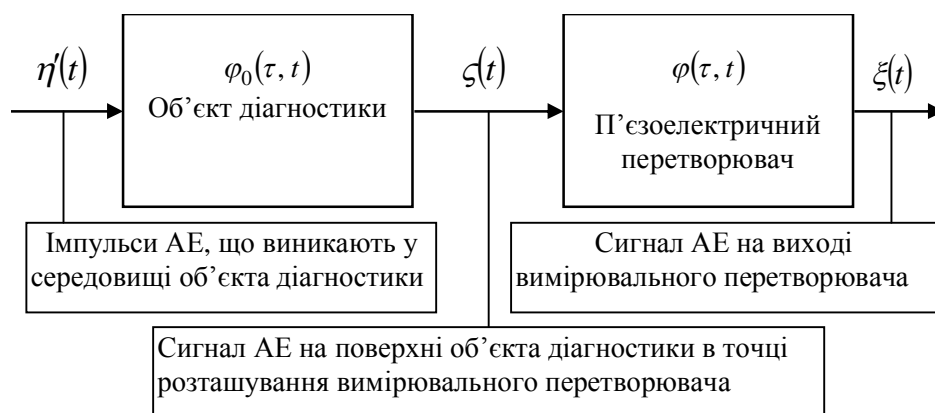


Рис. 3

Створені методи імітаційного моделювання діагностичних сигналів АЕ описано в [21].



**Технічні засоби для ІВС статистичної діагностики вузлів ЕО.** Головна мета даного напрямку полягала у вирішенні задач, пов'язаних з технічною реалізацією та практичним застосуванням ІВС статистичної діагностики окремих вузлів електроенергетичних машин. Створені ІВС базувались на вимірюванні та обробці діагностичних сигналів різної фізичної природи (вібрації, акустична емісія, ударна вібраційна хвиля та ін.). До складу типової структурної схеми ІВС діагностики входять:

- первинні вимірювальні перетворювачі (ПЕП), встановлені на досліджуваному об'єкті;
- модуль перетворення і вводу даних в ПЕОМ (контролер);
- власне ПЕОМ;
- пакет прикладних програм для обробки діагностичних сигналів;
- пакет програм, що реалізує вирішуючі правила;
- пакет програм, які забезпечують функціонування ІВС АЕ діагностики;
- блок прийняття рішення, що видає результат діагнозу.

Основним елементом створеної ІВС діагностики є програмне забезпечення, завдяки якому відбувається її функціонування і здійснюється діагностування окремих вузлів ЕО. Коротко основні складові створеного програмного забезпечення розглянуто нижче.

Окремо слід відзначити ІВС діагностики рухомих частин електричних машин. Технічна частина розробленої ІВС складається з двох основних частин:

- блоку сенсорів, що розташовується безпосередньо на об'єкті діагностики;
- блоку приймання та обробки інформації. Як такий може використовуватися ПЕОМ, до якої підключений Bluetooth приймач-передавач [14] за допомогою шини USB (universal serial bus – універсальна послідовна шина – зовнішня шина, що підтримує установку пристроїв, що самі настроюються в операційній системі). Основною частиною даного блоку є програмне забезпечення, що виконує функції обробки отриманого сигналу.

Блок сенсорів виконує функцію вимірювання, обробки та передачі вимірюваних на окремих вузлах електричних машин інформаційних сигналів. Кількість блоків сенсорів залежить від необхідної кількості інформаційних сигналів з різних вузлів електричної машини та обмежується 256 пристроями, чого більш ніж достатньо для вимірювання вібраційного сигналу заданого діапазону з окремих вузлів.

Аналоговий сигнал, знятий з вузла електричної машини, що діагностується, на виході з сенсора має вигляд DCM сигналу (duty cycle modulated – модуляція з коефіцієнтом заповнення). У нашому випадку вібраційний сигнал вимірюється за допомогою акселерометрів ADXL202 виробництва компанії Analog Devices. Частотна смуга ADXL202 може бути встановлена в межах від 0,01 Гц до 6 КГц, що достатньо для діагностування лобових частин обмоток ротора, теплового небалансу, що виникає при короткому замиканні окремих витків обмотки ротора, а також підшипників кочення низькооборотних (до 1000 об/хв.) електричних машин середньої потужності.

Акселерометр ADXL202 – готова двоосьова система вимірювання прискорення, представлена на єдиній монолітній інтегральній схемі. Блок вимірювання прискорення в аналоговому вигляді побудований за принципом зміни ємності вимірюючого елемента внаслідок фізичного переміщення частини вимірюючого елемента під дією прискорення, що вимірюється. Далі вимірюваний сигнал після проходження через блок демодуляції і резистивний фільтр надходить до блоку перетворення аналогового сигналу в DCM сигнал. Отриманий DCM сигнал передається за допомогою радіоканалу до блоку приймання та обробки інформації.

Зручність використання сенсорів, з виходів яких знімаються DCM сигнали, пов'язана з тим, що такі сенсори можуть бути напряму підключені до входу лічильника мікропроцесора без використання аналогово-цифрового перетворення або зв'язуючих логічних мікросхем, що спрощує процес обробки вимірюваного сигналу та збільшує час автономної роботи пристроїв. На виході мікроконтролера отримується цифровий сигнал, що містить вимірювану інформацію. Цей сигнал за командою з блоку приймання та обробки інформації або ж у визначені проміжки часу передається в ПЕОМ, де здійснюється статистична обробка прийнятих з блоку сенсорів інформаційних сигналів, за результатами якої діагностується технічний стан обертюваних вузлів електричних машин.

Блок приймання та обробки інформації, як основний логічний елемент ІВС, працює у двох режимах: у режимі навчання і режимі діагностики. Режим навчання використовується для формування навчаючих сукупностей, що відповідають певним технічним станам вузлів, які діагностуються. Визначення ж технічного стану досліджуваних вузлів здійснюється у режимі діагностики за одержаними статистичними оцінками діагностичних ознак [37]. Коректне функціонування блоку приймання

і обробки інформації забезпечується за допомогою програмних засобів ІВС, які докладно описані у [14]. Коротко зупинимось на деяких з них.

**Методи, алгоритми, та програмне забезпечення для ІВС статистичної діагностики.** Програмні засоби ІВС діагностики умовно можна розбити на три основні групи:

- програми управління вводом-виводом;
- програми статистичного аналізу діагностичних сигналів, які досліджуються;
- програми побудови розв'язуючих правил і класифікації можливих дефектів.

Окремо можна виділити програмне забезпечення для прогнозування можливих відмов досліджуваного ЕО. Таке програмне забезпечення використовується деякими видами ІВС, які здійснюють акустоemisійну та вібраційну діагностику певних вузлів ЕО.

Програма вводу-виводу реалізує наступні функції:

- введення оцифрованого сигналу в ПЕОМ;
- виведення даних у графічному або цифровому вигляді на екран;
- запис даних на носії;
- обрахунок даних носіїв;
- керування обсягом вибірки оцифрованого сигналу.

Друга група програм, що входять до складу ІВС статистичної діагностики, – програми статистичного аналізу. Ці програми виконують функції обробки і аналізу оцифрованих діагностичних сигналів таких, як перевірка оцифрованого сигналу на стаціонарність і різні види статистичного аналізу діагностичних сигналів. Вони базуються на методах кореляційного, спектрального або гістограмного аналізу. Зокрема, розроблені програми дозволяють визначити оцінки початкових моментів і центральних моментів до четвертого включно, коефіцієнтів асиметрії та ексцесу, інтервалу варіювання, будувати гістограми і згладжувати їх по системі кривих Пірсона, а також одержувати згладжені оцінки спектрів потужності і взаємних амплітудних спектрів з оцінкою дисперсії отриманих оцінок спектрів.

До третьої групи входять програми, що реалізують розв'язуючі правила по виявленню та класифікації дефектів. Вони ґрунтуються на методах розпізнавання статистичних гіпотез (зокрема, на методі Неймана-Пірсона) та теорії розпізнавання образів.

Прогнозування відмов ЕО здійснюється завдяки програмам, що ґрунтуються на теорії статистичних сплайн-функцій та методах авторегресії [16].

#### **4. Розрахункові дослідження електромагнітного поля і магнітопружних деформацій магнітних систем потужного електротехнічного обладнання.**

Протягом останнього року у відділі продовжувалися роботи, пов'язані з розробкою алгоритмів та проведенням розрахункових досліджень електромагнітного поля та параметрів потужних трансформаторів і реакторів:

- проведена класифікація математичних моделей, які використовуються для розрахунку електромагнітного поля в елементах і вузлах потужного електроенергетичного устаткування та розроблено загальні вимоги для побудови просторових розрахункових моделей потужного електроенергетичного устаткування (трансформатори, реактори) [2–4, 33];
- створено математичні моделі та алгоритми для розрахунку просторового розподілу електромагнітного поля та інших параметрів феромагнітних частин потужного електроенергетичного устаткування (бак, ярмові балки) [5];
- розроблено алгоритми визначення поверхневих втрат у феромагнітних елементах від допитної складової напруженості магнітного поля на поверхні феромагнітних елементів [2];
- розроблено розрахункові алгоритми визначення складових індукції магнітного поля в області обмоток (по котушках) з метою подальшого розрахунку втрат на вихрові струми та електродинамічної стійкості;
- розроблено методики та алгоритми, використані для проведення розрахункових досліджень трифазних моделей трансформатора і реактора [2–5, 17, 33, 35, 36].

У даній роботі зупинимось на питанні розрахунку магнітопружних деформацій магнітних систем потужного електроенергетичного устаткування (трансформатори, реактори) як спільного розв'язку задачі електромагнітного поля та механіки [18, 34, 35].

Як відомо, робота багатьох електротехнічних пристроїв супроводжується підвищеним звуковим навантаженням, що має шкідливий вплив на оточення. Одним із основних джерел шуму, зокрема, силових трансформаторів та електричних реакторів, є віброактивність магнітних систем (МС) за рахунок магнітострикції електротехнічної сталі МС у змінному магнітному полі з частотою 50–60 Гц.

Механічні коливання МС через охолоджуюче масло, конструктивні елементи та бак трансформатора передаються в оточуюче середовище. Шум трансформаторів відображає якість застосованих матеріалів, інтенсивність електромагнітних навантажень, їхній технічний стан. По інтенсивності і частотному аналізу звукового випромінювання визначають діагностичні показники роботи трансформатора в цілому або його окремих елементів. У даний час магніострикція та явища, що її супроводжують (вібрації, шум), в основному вивчаються експериментально. Тому чисельні дослідження магніострикції та магнітопружних деформацій можуть служити основою для подальшого чисельного дослідження вібрацій та шумів у потужному електроенергетичному устаткуванні.

В останні роки проблемі впливу ефекту магніострикції на магнітопружні деформації присвячена достатньо велика кількість робіт. Ґрунтовний огляд наукових розробок наведено у [37]. Слід зазначити, що основна частина робіт у [37] носить суто теоретичний характер, що дає змогу для вивчення ефекту магніострикції та практичного застосування запропонованих підходів та ідей в практичних цілях при розробці потужного енергетичного устаткування. Проведений аналіз вказує на доцільність розробки алгоритмів та проведення чисельних досліджень магнітопружних деформацій МС потужного електроенергетичного устаткування на основі спільного розв'язку задачі механіки та магнітного поля. Основні співвідношення для магніострикції наведені у [18, 34].

**Зв'язана задача магніострикції і механіки.** Густина внутрішньої енергії для феромагнітного матеріалу має вигляд [6,18,34,37]

$$E = \int_V W^e dV + \int_V W^m dV . \quad (19)$$

Величина  $W^e$  в (19) – густина пружної енергії, що запасється в тілі,  $W^m$  – магнітопружна енергія. За наявності зовнішнього напруження  $\sigma_{ij}$  ця енергія дорівнює

$$W^m = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} , \quad (20)$$

де  $\sigma_{ij}$  – напруження, що пов'язані з магніострикцією.

Розв'язок лінійної задачі можна знайти, виходячи із принципу мінімуму енергії. Наближений розв'язок (20) знаходиться мінімізацією функціонала  $E$  щодо переміщень [6].

**Зв'язана задача магнітного поля і магнітопружних деформацій.** Спочатку розв'язується задача розрахунку магнітного поля, а потім значення магнітної індукції та інших необхідних величин використовуються для обчислення магнітопружних деформацій. Для вирішення задачі використовується програмне середовище ANSYS [32] і скінченний елемент, що має шість ступенів свободи [32]

$$\{q^e\}^T = \{u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3\}, \quad (21)$$

де  $u, v$  – значення деформацій та переміщень у вузлах елемента відповідно.

Виконуючи стандартні обчислення, які детально наведені у [18, 34], отримаємо

$$E^e = \frac{1}{2} \{q^e\}^T [K^e] \{q^e\} - \{g^e\}^T \{q^e\}, \quad (22)$$

де  $[K^e]$  – матриця жорсткості елемента,  $\{g^e\}$  – узагальнений вектор зусиль, що враховує магніострикцію. Вектор  $\{g^e\}$  визначається виразом

$$\{g^e\} = \frac{S}{2|S|} \begin{pmatrix} -\frac{3}{2} \eta_1 (C_{11} - C_{12}) \lambda (\alpha_1^2 - a/3) - \eta_1 (C_{11} + 2C_{12}) a \varepsilon + 1,5 \xi_1 (C_{11} - C_{12}) \lambda \alpha_1 \alpha_2 \\ \frac{3}{2} \xi_1 (C_{11} - C_{12}) \lambda (\alpha_1^2 - a/3) + \xi_1 (C_{11} + 2C_{12}) a \varepsilon - 1,5 \eta_1 (C_{11} - C_{12}) \lambda \alpha_1 \alpha_2 \\ -\frac{3}{2} \eta_2 (C_{11} - C_{12}) \lambda (\alpha_1^2 - a/3) - \eta_2 (C_{11} + 2C_{12}) a \varepsilon + 1,5 \xi_2 (C_{11} - C_{12}) \lambda \alpha_1 \alpha_2 \\ \frac{3}{2} \xi_2 (C_{11} - C_{12}) \lambda (\alpha_1^2 - a/3) + \xi_2 (C_{11} + 2C_{12}) a \varepsilon - 1,5 \eta_2 (C_{11} - C_{12}) \lambda \alpha_1 \alpha_2 \\ -\frac{3}{2} \eta_3 (C_{11} - C_{12}) \lambda (\alpha_1^2 - a/3) - \eta_3 (C_{11} + 2C_{12}) a \varepsilon + 1,5 \xi_3 (C_{11} - C_{12}) \lambda \alpha_1 \alpha_2 \\ \frac{3}{2} \xi_3 (C_{11} - C_{12}) \lambda (\alpha_1^2 - a/3) + \xi_3 (C_{11} + 2C_{12}) a \varepsilon - 1,5 \eta_3 (C_{11} - C_{12}) \lambda \alpha_1 \alpha_2 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

де

$$\begin{aligned} \xi_1 &= x_3 - x_2, & \xi_2 &= x_1 - x_3, & \xi_3 &= x_2 - x_1, \\ \eta_1 &= y_3 - y_2, & \eta_2 &= y_1 - y_3, & \eta_3 &= y_2 - y_1, \\ S &= \xi_2 \eta_3 - \xi_3 \eta_2, & a &= 1 - C_{12}/C_{11}. \end{aligned} \quad (24)$$

Виходячи з принципу мінімуму енергії для (22)  $\partial E^e / \partial \{q^e\} = 0$ , отримуємо наступне співвідношення для елемента

$$[K^e] \{q^e\} = \{g^e\}. \quad (25)$$

Підсумовуючи (25) по всіх скінченних елементах, отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для всього ансамблю скінченних елементів

$$[K] \{q\} = \{g\}, \quad (26)$$

розв'язок якої дозволяє визначити деформації і переміщення пристрою із врахуванням магнітострикції.

**Приклад чисельного розрахунку.** Чисельне моделювання проведено для однофазного масляного трансформатора потужністю 40 МВА. Ескіз розрахункової моделі магнітної системи з обмотками, розраховане магнітне поле та деформацію стрижнів магнітної системи трансформатора наведено на рис. 4–6 відповідно.

#### Висновки.

1. Проаналізовано процеси в *RLC*-колі синусоїдної напруги при реверсуванні в ній ємнісного або індуктивного елемента. Одержано рекурентні співвідношення, що дають можливість знаходити напругу на ємності і струм через індуктивність на будь-якому проміжку часу, незалежно від кількості реверсувань до цього при симетричному та несиметричному керуванні перемиканням. Досліджено основні режими роботи кола (коливальний, граничний, аперіодичний).

2. Виконані оцінки основних параметрів нагрівання рухомих металевих стрічок у змінному високочастотному полі дозволили визначити можливість застосування спрощених математичних моделей загальної задачі взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів і знайти умови, при яких достатньо визначити лише енергію, що передається стрічці електромагнітним полем.

3. На базі математичної моделі лінійних випадкових процесів було узагальнено підхід до імітаційного моделювання сигналів АЕ та створено відповідне програмне забезпечення. Обґрунтовано необхідність врахування власних характеристик датчиків АЕ при вимірюванні сигналів АЕ. Результати імітаційного моделювання сигналів АЕ дозволили обґрунтувати можливість використання в якості діагностичної ознаки інтенсивності  $\lambda$  сигналів АЕ.

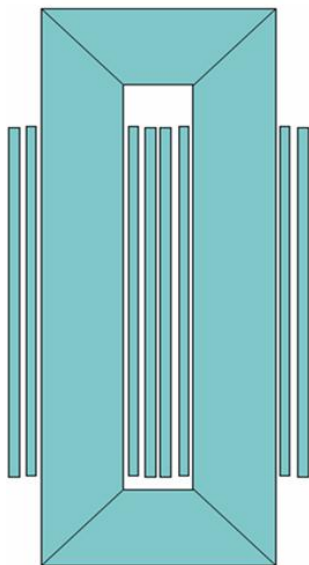


Рис. 4

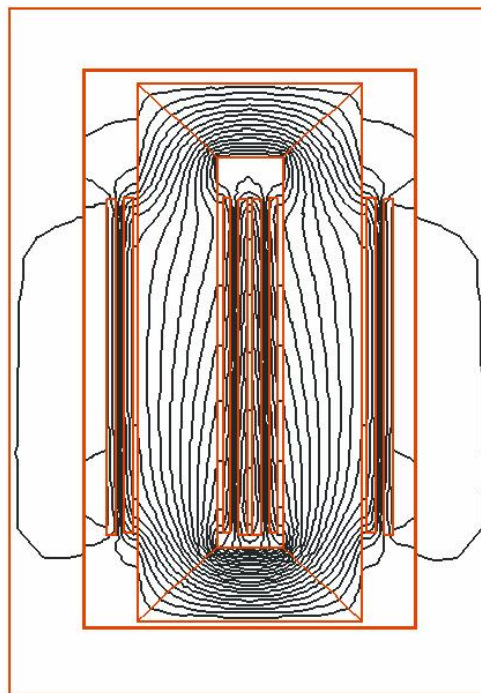


Рис. 5

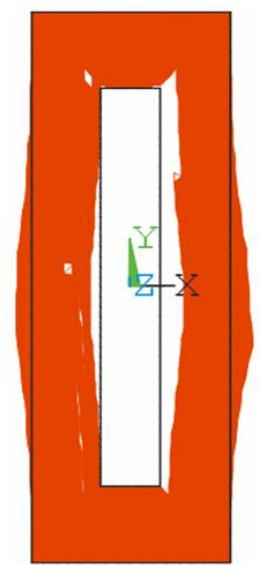


Рис. 6

4. Розроблено і експериментально перевірено лабораторний зразок ІВС діагностики та прогнозування надійності вузлів ЕО, у тому числі рухомих. У цьому зразку ІВС реалізовано принципово новий підхід до вимірювання і передачі діагностичних сигналів з рухомих частин електроенергетичних машин, який базується на використанні сучасних технологій передачі інформації з використанням стандарту Bluetooth.

5. Розроблено, відлагоджено і експериментально перевірено повний комплекс програмного забезпечення для ІВС діагностики з прогнозуванням надійності, до якого входять програми статистичної обробки реалізацій діагностичних сигналів, що дозволяють одержувати кількісні оцінки діагностичних ознак за результатами спектрально-кореляційного та гістограмного аналізу діагностичних сигналів. Застосування у створених лабораторних зразках ІВС діагностики вузлів ЕО програмного забезпечення, що базується на методах статистичних сплайнів, дозволило здійснювати прогнозування відмов певних вузлів ЕО. Це дозволяє відмовитись від проведення планово-попереджувальних ремонтів вузлів ЕО, а здійснювати їхній ремонт за фактичним станом ЕО.

6. Запропонований у роботі чисельний алгоритм розрахунку магнітопружних деформацій за допомогою програмного середовища ANSYS може бути застосований при дослідженні потужного електроенергетичного устаткування (трансформаторів, реакторів) різних типів.

1. *Аристов Ю.В., Васецкий Ю.М.* Магнитная система в виде тонкого тора с наклонными катушками: аналитическая модель; магнитные поля // *Технічна електродинаміка*. – 2008. – № 3. – С. 9–15.
2. *Басова А.В., Жук В.В., Иванков В.Ф., Кокошин С.С., Химюк И.В.* Анализ электромагнитных и механических процессов в силовых трансформаторах и реакторах методом конечных элементов // *Техн. електродинаміка*. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – Ч. 3. – 2008. – С. 9–14.
3. *Басова А.В., Иванков В.Ф., Кокошин С.С., Химюк И.В.* Исследование электромагнитных параметров электрических реакторов методами конечно-элементного анализа // В кн.: XI Международная научно-техническая конференция “Трансформаторостроение – 2005”. – Запорожье. – 2005. – 161 с. (С. 75).
4. *Басова А.В., Иванков В.Ф., Кокошин С.С., Химюк И.В.* Опыт применения ANSYS для электромагнитных исследований силовых трансформаторов и электрических реакторов // В кн. Сборник трудов Седьмой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH. (Москва, 23-24 мая 2007 г.) / Под ред. А.С.Шадского. – М.: Полигон-пресс. – 2003. – С. 119–125.
5. *Басова А.В., Иванков В.Ф., Кокошин С.С., Химюк И.В.* Числове моделювання магнетного поля, втрат у провідних деталях на стрижнях трансформаторів та реакторів // *Техн. електродинаміка*. Тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – Ч. 3. – 2010. – С. 25–30.
6. *Белов К.П.* Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах. – М.-Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1951. – 254 с.
7. *Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А.* Асимптотические методы нелинейной механики. – М. Наука, 1974. – 504 с.
8. *Васецкий Ю.М.* Асимптотические методы решения задач электродинамики в системах с массивными криволинейными проводниками. – К.: Наукова думка, 2010. – 271 с.
9. *Васецкий Ю.М., Городжа Л.В., Мазуренко И.Л.* Оценка параметров для приближенных математических моделей электромагнитных систем с вихревыми токами // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – Ч. 2. – С. 7–12.
10. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л.* Геометрические параметры электромагнитных систем для высокочастотного индукционного нагрева металлических лент // *Технічна електродинаміка*. – 2009. – № 5. – С. 9–15.
11. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л.* Параметры электромагнитных и тепловых процессов для приближенных математических моделей высокочастотного индукционного нагрева электропроводных лент // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – № 5. – С. 10–17.
12. *Васецкий Ю.М., Мазуренко И.Л., Аристов Ю.В.* Магнитное поле тонкого тороидального соленоида с наклонными катушками // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Далія*. – 2007. – № 4 (110). – Част. 1. – С. 91–100.
13. *Вольтерс А.О., Мислович М.В., Соболевська Л.Г.* Моделі лінійних і лінійних періодичних випадкових процесів та їх використання в інформаційно-вимірювальних системах діагностики роторних енергетичних машин // *Техн. електродинаміка*. Тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – Ч. 2. – С. 77–82.
14. *Гишко Ю.І., Мислович М.В.* Особливості побудови інформаційно-вимірювальних систем діагностики рухомих частин електротехнічного обладнання // *Праці інституту електродинаміки НАН України*. – 2007. – №2(17). – С. 107–115.
15. *Городжа К.А., Мислович М.В., Сисак Р.М.* Моделювання відгуків електротехнічного обладнання на ударний вплив та використання його результатів при створенні автоматизованих систем діагностики // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2009. – № 654. – С. 65–70.

16. Зварич В.М., Мислович М.В., Сисак Р.М. Методи прогнозування відмов двигунів власних потреб електростанцій та їх використання в інформаційно-вимірювальних системах // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Част.3. – С. 67–70.
17. Іванков В.Ф., Басова А.В., Хімюк І.В., Кокошин С.С., Іванков В.О. Розрахунок магнетного поля, втрат та нагріву у пресувальній пластині і електростатичному екрані на стрижні трансформатора і шунтувального реактора // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 46–53.
18. Іванков В.Ф., Кокошин С.С., Хімюк І.В. Чисельне дослідження магнітопружних деформацій в потужному трансформаторі // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник нац. університету “Львівська політехніка”. – 2009. – № 654. – С. 88–92.
19. Марченко Б.Г. Лінійні періодичні процеси // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка. – 1999. – С. 172–185.
20. Марченко Б.Г. Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – К.: Наук. думка, 1992. – 195 с.
21. Мислович М.В., Сисак Р.М., Улітко О.В. Імітаційне моделювання процесів акустичної емісії для діагностики електротехнічного обладнання // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 23–29.
22. Потороча В.В., Кравченко О.П., Самойленко В.Г., Шидловська Н.А. Побудова наближених розв’язків слабо збурених диференціальних рівнянь теорії нелінійних електричних кіл // В зб.: Крайові задачі для диференціальних рівнянь. – 2006. – № 14. – С. 168–175.
23. Улітко А.В. Моделирование процессов акустической эмиссии и использование его результатов в информационно-измерительных системах электроэнергетического оборудования // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – С. 243–248.
24. Шидловська Н.А., Кравченко О.П. Аналіз електричних кіл з перемиканнями за допомогою елементів теорії диференціальних рівнянь з імпульсною дією // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Електроенергетика. – 2005. – С. 3–6.
25. Шидловська Н.А., Кравченко О.П., Кучерява І.М., Самойленко В.Г. Застосування методу усереднення Боголюбова до аналізу процесів в нелінійних коливальних колах з втратами // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Част. 2. – С. 3–6.
26. Шидловська Н.А., Кравченко О.П., Самойленко В.Г. Аналіз нелінійного кола за допомогою методу усереднення Боголюбова // Доповіді НАН України. – 2006. – №6. – С. 88–92.
27. Шидловська Н.А., Кравченко О.П., Самойленко В.Г. Аналітичний метод дослідження нелінійних розрядних кіл // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 5. – С. 3–10.
28. Шидловська Н.А., Кравченко О.П., Самойленко В.Г. Дослідження нелінійних розрядних кіл в режимах роботи, близьких до резонансних // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 3–7.
29. Шидловська Н.А., Кравченко О.П., Самойленко В.Г. Оригінальний метод дослідження слабконелінійних RLC-кіл // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2010. – Част. 1. – С. 159–164.
30. Шидловська Н.А., Кравченко О.П., Самойленко В.Г., Кучерява І.М. Порівняльний аналіз аналітичного та чисельного методів розрахунку процесів у нелінійному електричному колі // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 3–6.
31. Шидловська Н.А., Самойленко В.Г. Про деякі задачі нелінійної електротехніки і математичні методи їх дослідження // Технічна електродинаміка. – 2008. – №5. – С. 3–11.
32. ANSYS/Structural/Emag3D. Ліцензійна версія ВАР “ЗТР” від 22.11.2002.
33. Basova A., Ivankov V., Kokoshyn S., Khimjuk I. Numerical research of the electromagnetics fields in powerful transformers and reactors // Przegląd Elektrotechniczny. – CPPE-2007. – № 2. – P. 261–264.
34. Ivankov V., Kokoshyn S., Khimjuk I. Modeling of magnetoelastic deformations of magnetic materials in electroenergy devices // Przegląd Elektrotechniczny. – 2010. – № 1. – P. 152–154.
35. Ivankov V., Kokoshyn S., Khimjuk I. Modeling of magnetoelastic deformations of magnetic materials in electroenergy devices // X-th International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”. – Waplewo, Poland. Sept. 17-19. – 2009. – P. 42–48.
36. Kokoshyn S.S., Khimjuk I.V., Basova A.V., Ivankov V.F. Numerical modeling of eddy currents and heating in nonmagnetic steel structural elements of powerful transformers and electric reactors // XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. ISTET’05, Lviv. – 2005. – P. 52–54.
37. Lundgren A. On measurement and modelling of 2D magnetization and magnetostriction of SiFe sheets. – KTH Reprocental: Stockholm, 1999. – 199 p.
38. Vasetsky Yu., Mazurenko I. Parameters of electromagnetic systems with eddy currents for using in approximate mathematical models // Proceedings of the VII Intern. Workshop: Computation Problems of Electrical Engineering. Odessa, August 27–30, 2006. – P. 190–193.

## Современные информационные технологии в решении задач электротехники и повышение надежности электротехнического оборудования

**Н.А.Шидловская**, член-корреспондент НАН Украины, **Ю.М.Васецкий**, докт.техн.наук, **М.В.Мыслович**, докт.техн.наук, **И.В.Химюк**, канд.техн.наук,

**Институт электродинамики НАН Украины,**  
**пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**

*Излагаются основные научные результаты, полученные в отделе теоретической электротехники Института электродинамики НАН Украины по итогам выполнения научно-исследовательской темы «Комплекс-2», которая выполнялась на протяжении 2006–2010 годов. Исследования проводились по основным направлениям работы отдела: развитие теории и создание эффективных аналитических методов исследования процессов в нелинейных электрических цепях; разработка асимптотических и численно-аналитических методов расчета электромагнитных систем; развитие теории и методов практического использования информационно-измерительных систем статистической диагностики электроэнергетического оборудования; разработка математических моделей и численное исследование связанных электромагнитных, механических и акустических полей в электроэнергетическом оборудовании. Библ. 38, табл. 1, рис. 6.*

**Ключевые слова:** математическая модель, аналитический метод, электротехническое оборудование, техническая диагностика.

## Modern information technologies for tasks of electrical engineering and increase of reliability of power electrical equipment

**N.A.Shydlovska, Yu.M.Vasetskyi, M.V.Myslovych, I.V.Khimiuk,**  
**Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,**  
**Peremogy av., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

*The main scientific results are discussed which were obtained in the department of theoretical electrical engineering of the Institute of electrodynamics of Ukrainian National Academy of Sciences on the outcome of the implementation of scientific work "Complex-2", which was performed during the 2000–2010 period. Researches were conducted in the main areas of department's work: development of theory and creation of effective analytical methods of research of processes in nonlinear electric circuits; development of asymptotic methods of numerical-analytical computation of the electromagnetic systems; development of theory and methods of the practical use of the informative-measuring systems of statistical diagnostics of power electrical equipment; development of mathematical models and numerical research of the linked electromagnetic, mechanical and acoustic fields in the power electrical equipment. References 38, table 1, figures 6.*

**Key words:** mathematical model, analytical method, power electrical equipment, technical diagnostics.

1. Aristov Yu.V., Vasetskiy Yu.M. Magnetic system in form of thin torus with incline coils: analytical model; magnetic fields // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2008. – № 3. – P. 9–15. (Rus)
2. Basova A.V., Zhuk V.V., Ivankov V.F., Kokoshyn S.S., Khimiuk I.V. Analysis of electromagnetic and mechanical processes in power transformers and reactors by finite elements method // *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Problemy suchasnoi elektrotekhniki»*. – Vol. 3. – 2008. – P. 9–14. (Rus)
3. Basova A.V., Ivankov V.F., Kokoshin S.S., Khimiuk I.V. Investigation of electromagnetic parameters of electrical reactors by methods of finite-element analysis // *Proceedings of XI International scientific and technical conference "Transformatorostroenie – 2005"*. – Zaporozhie. – 2005. – 161 p. (P. 75). (Rus)
4. Basova A.V., Ivankov V.F., Kokoshin S.S., Khimiuk I.V. Experience of application of ANSYS to electromagnetic investigations of power transformers and electrical reactors // *Proceedings of 7th conference of CAD-FEM GmbH software users. Moscow, 23-24 May 2007*. – Moskva: Poligon-press. – 2007. – P. 119–125. (Rus)
5. Basova A.V., Ivankov V.F., Kokoshyn S.S., Khimiuk I.V. Numerical modeling of magnetic field, losses in the conduction parts on cores of transformers and reactors // *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – Vol. 3. – 2010. – P. 25–30. (Ukr)
6. Belov K.P. Elastic, thermal and electrical phenomena in ferromagnetic metals. – Moskva-Leningrad: Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhn.-teoret. literatury, 1951. – 254 p. (Rus)
7. Bogoliubov N.N., Mitropolskiy Yu.A. Asymptotic methods of non-linear mechanics. – Moskva: Nauka, 1974. – 504 p. (Rus)
8. Vasetskiy Yu.M. Asymptotical methods for solving problems of electrodynamics in systems with massive curvilinear conductors. – Kyiv: Naukova dumka, 2010. – 271 p. (Rus)
9. Vasetskiy Yu.M., Gorodzha L.V., Mazurenko I.L. Estimation of parameters for approximate mathematical models of electromagnetic systems with eddy currents // *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2006. – Vol. 2. – P. 7–12. (Rus)
10. Vasetskiy Yu.M., Mazurenko I.L. Geometrical parameters of electromagnetic systems for high-frequency induction heating of metallic stripes // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2009. – № 5. – P. 9–15. (Rus)
11. Vasetskiy Yu.M., Mazurenko I.L. Parameters of electromagnetic and thermal processes for approximate mathematical models of high-frequency induction heating of electroconductive stripes // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2010. – № 5. – P. 10–17. (Rus)
12. Vasetskiy Yu.M., Mazurenko I.L., Aristov Yu.V. Magnetic field of thin toroidal solenoid with incline coils // *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V.Dalia*. – 2007. – № 4 (110). – Vol. 1. – P. 91–100. (Rus)

13. *Volters A.O., Myslovych M.V., Sobolevska L.H.* Models of linear and linear periodic stochastic processes and their usage in information-measuring systems of diagnostics of rotor power machines // *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – Vol. 2. – 2006. – P. 77–82. (Ukr)
14. *Gyzhko Yu.I., Myslovych M.V.* Features of information-measuring systems of vibrational diagnostics of moving parts of electrical equipment // *Pratsi instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. – 2007. – №2(17). – P. 107–115. (Ukr)
15. *Gorodzha K.A., Myslovych M.V., Sysak R.M.* Modeling of responses of power electrical equipment to impact excitation and usage of its results in designing of automated diagnostic systems // *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. – 2009. – № 654. – P. 65–70. (Ukr)
16. *Zvarych V.M., Myslovych M.V., Sysak R.M.* Methods of forecasting of auxiliary engines failures and their usage in information-measuring systems // *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Problemy suchasnoi elektrotekhniki»*. – 2008. – Vol.3. – P. 67–70. (Ukr)
17. *Ivankov V.F., Basova A.V., Khimiuk I.V., Kokoshyn S.S., Ivankov V.O.* Calculation of magnetic field, losses and heating in pressing plate and electrostatic shield on the core of transformer and shunting reactor // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2009. – № 6. – P. 46–53. (Ukr)
18. *Ivankov V.F., Kokoshyn S.S., Khimiuk I.V.* Numerical investigation of magneto-elastic deformations in power transformer // *Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy. Visnyk nats. universytetu "Lvivska politekhnika"*. – 2009. – № 654. – P. 88–92. (Ukr)
19. *Marchenko B.H.* Linear stochastic processes // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy. Elektrotekhnika*. – 1999. – P. 172–185. (Ukr)
20. *Marchenko B.H., Myslovich M.V.* Vibrodiagnostics of bearing units of electrical machines. – Kyiv: Naukova dumka, 1992. – 195 p. (Rus)
21. *Myslovych M.V., Sysak R.M., Ulitko O.V.* Simulation of acoustic emission processes for diagnostics of power electrical equipment // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2010. – №6. – P. 23–29. (Ukr)
22. *Potorocha V.V., Kravchenko O.P., Samoilenko V.G., Shydlovska N.A.* Approximate solution of weakly perturbed differential equations from theory of nonlinear electrical circuits // *Krayovi zadachi dlia dyferentsialnykh rivnian*. – Chernivtsi, 2006. – № 14. – P. 168–175. (Ukr)
23. *Ulitko O.V.* Modeling of acoustic emission // *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. – 2009. – P. 243–248. (Rus)
24. *Shydlovska N.A., Kravchenko O.P.* Analysis of electrical circuits with commutations with usage of elements of theory of differential equations with impulse effect // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky. Elektroenergetyka*. – 2005. – P. 3–6. (Ukr)
25. *Shydlovska N.A., Kravchenko O.P., Kucheriava I.M., Samoilenko V.G.* Application of Bogoliubov's averaging method to analysis of processes in non-linear oscillating circuits with losses // *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2006. – Vol. 2. – P. 3–6. (Ukr)
26. *Shydlovska N.A., Kravchenko O.P., Samoilenko V.G.* Analysis of nonlinear circuit with usage of Bogoliubov's averaging method // *Dopovidi NAN Ukrainy*. – 2006. – №6. – P. 88–92. (Ukr)
27. *Shydlovska N.A., Kravchenko O.P., Samoilenko V.G.* Analytical method for investigation of nonlinear discharge circuits // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2009. – № 5. – P. 3–10. (Ukr)
28. *Shydlovska N.A., Kravchenko O.P., Samoilenko V.G.* Investigation of nonlinear discharge circuits in regimes close to resonance // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2009. – № 6. – P. 3–7. (Ukr)
29. *Shydlovska N.A., Kravchenko O.P., Samoilenko V.G.* Original method of investigation of weakly nonlinear *RLC*-circuits // *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist"*. – 2010. – Vol. 1. – P. 159–164. (Ukr)
30. *Shydlovska N.A., Kravchenko O.P., Samoilenko V.G., Kucheriava I.M.* Comparative analysis of analytical and numerical methods for evaluation of processes in nonlinear electrical circuit // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2009. – № 1. – P. 3–6. (Ukr)
31. *Shydlovska N.A., Samoilenko V.G.* About some problems of nonlinear electrical engineering and mathematical methods for their investigation // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2008. – №5. – P. 3–11. (Ukr)
32. ANSYS/Structural/Emag3D. Licensed version from "ZTR" Corp., 22.11.2002.
33. *Basova A., Ivankov V., Kokoshyn S., Khimjuk I.* Numerical research of the electromagnetics fields in powerful transformers and reactors // *Przeglad Elektrotechniczny*. – CPEE-2007. – № 2. – P. 261–264.
34. *Ivankov V., Kokoshyn S., Khimjuk I.* Modeling of magnetoelastic deformations of magnetic materials in electroenergy devices // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2010. – № 1. – P. 152–154.
35. *Ivankov V., Kokoshyn S., Khimjuk I.* Modeling of magnetoelastic deformations of magnetic materials in electroenergy devices // *X-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering"*. – Waplewo, Poland. Sept. 17-19. – 2009. – P. 42–48.
36. *Kokoshyn S.S., Khimjuk I.V., Basova A.V., Ivankov V.F.* Numerical modeling of eddy currents and heating in nonmagnetic steel structural elements of powerful transformers and electric reactors // *XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. ISTET'05, Lviv*. – 2005. – P. 52–54.
37. *Lundgren A.* On measurement and modelling of 2D magnetization and magnetostriction of SiFe sheets. – KTH Reprocental: Stockholm, 1999. – 199 p.
38. *Vasetsky Yu., Mazurenko I.* Parameters of electromagnetic systems with eddy currents for using in approximate mathematical models // *Proceedings of the VII Intern. Workshop: Computation Problems of Electrical Engineering*. Odessa, August 27–30, 2006. – P. 190–193.

Надійшла 15.06.2011  
Received 15.06.2011